

## 資料 Note

## 送変電機器技術変遷の半世紀

川 口 芳 弘

A half Century in High Voltage Apparatus Technology  
For Electric Power Transmission

Yoshihiro KAWAGUCHI\*

**Synopsis:** Electric power demand has significantly increased for the last half century especially in Japan after the 2<sup>nd</sup> World War. Responding to these trend, high voltage engineering has developed a important way to the economical and reliable power supply complying with the social requirement, based on Insulation Co-ordination for power system. Those philosophy has naturally reflected the development of new reasonable construction of various high voltage apparatus such as transformer, switchgear and others for power transmission, altogether with the new available materials like ZnO nonlinear disks for surge arresters, SF<sub>6</sub> gas for circuit breakers.

The paper will describe their historical review, which was discoursed as the final lecture on the occasion of the author's retirement from the university, retrospecting his works and experience in the manufacturing company and in the university.

Finally some technical requirement for the power supply in the 21st Century will be prospected.

**Keywords:** Electric Power, History, Insulation Co-ordination, Transformer, Switchgear, Surge Arrester, ZnO Disk, SF<sub>6</sub> Gas

**要 旨:** 第二次世界大戦終了後の半世紀間に、特に日本の電力需要は著しく伸張した。これは単に戦後の復興だけでなく、昭和20年代後半からの3W（洗濯機、冷蔵庫、白黒TVの白物三種の神器）、更に昭和30年代後半からの3C（Cooler, ColorTV, Car）などによって代表されるような主に家電製品が家庭に多く入り込み、これに伴って電力需要が戦前以上に伸びたためであろう。これに対処するために発電、送電、配電部門の電力技術者は一丸となって、経済的にしかも信頼性のある電力供給に向けて努力した。

その柱とも言えるものは何であったか、戦後の半世紀を経た今日、振り返ってみることは意義あることと考える。我田引水かも知れないが、その一つに絶縁協調理論に裏打ちされた大きな Concept があったと私は捉えている。

今後の技術開発の方向を知るのに参考になると思い、過去半世紀間の展望を試みた。

## は し が き

筆者は1932年（昭和7年）1月15日の誕生である。従って、戦中戦後の混乱期に主要な教育を受け、戦後の間もない1953年、戦後の二回目の定期採用で東芝に就職できた。それ以来、主に送変電用高電圧機器の開発、設計に40年間携わってきた。

その間、人口増、国内生産高の向上と相俟って、国民の生活も極めて豊かになった。

斯様にして、見事に復興を成し遂げ、世界の経済大国

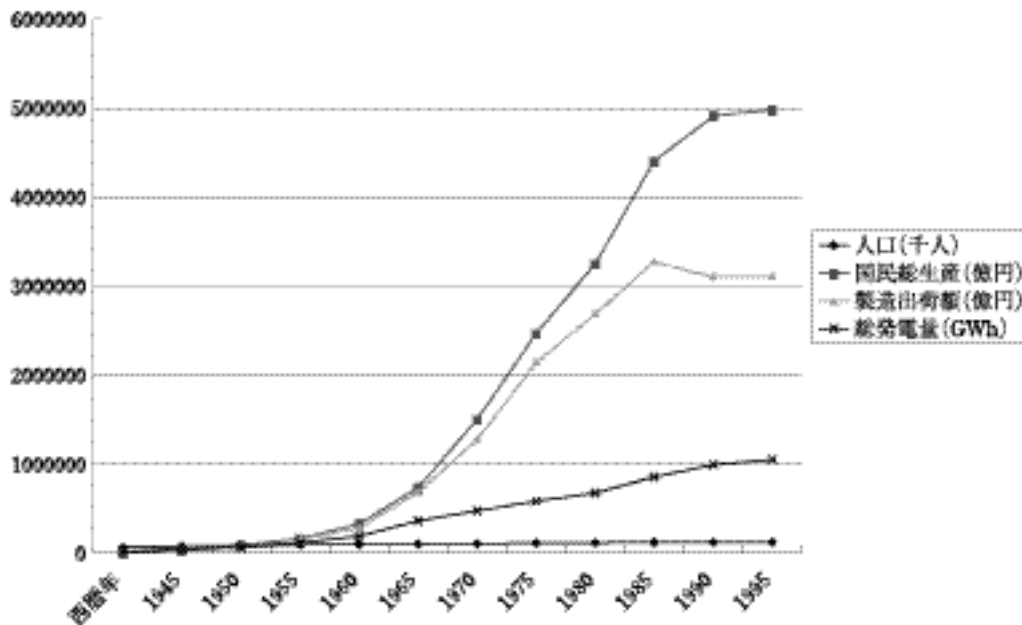
にまでなった。

周知の様に、3W, 3C で代表される好景気時代は弥が上にも電力需要の上昇を招いた。

これに対処するための電力供給は従来の延長線上の技術では経済性、信頼性の確保が困難となった。即ち、単位発電機の大容量化と送電電圧を上げるだけの単純な施策では到底解決策にならなかった。そこに、絶縁協調理論に基いた系統に発生する各種過電圧の抑制、機器の試験電圧の低減、更には、避雷器用酸化亜鉛素子、六弗化硫黄ガスの利用などあらゆる Seeds が Needs と絡み合って、見事な技術が作り出されたと言えよう。

偶々、私の定年退職に際して、最終講義の機会を頂いたので、それをここに改めて書き物にした次第である。

\* 前 国士舘大学工学部電気電子工学科 教授、電気学会終身会員、IEEE Life Fellow

図1 人口、国民総生産、製造出荷額、総発電量の統計<sup>1)</sup>

## 1. 社会情勢と電力需要の伸び<sup>1)</sup>

戦後の人口、国民総生産高（GNP）、製造出荷額、総発電量の統計を図1に示した。又、日本の電灯配電事業始まって以来の主要な社会情勢を表1に示した。

図1から1945年対比で、2000年の諸元を見ると、人口1.6倍、GNP 60倍、製造出荷額45倍強、総発電量48倍となっている。

明らかに、人口増に対して他の諸元が著しく増加している。国民総生産の伸びには三次産業が寄与していると思われる。

取り分け、総発電量の伸びが製造出荷額を若干上回っているのは、多分国民の豊かな生活を支える為のエアコンなどによるものと推定される。総じて、これらを下記のような観点から捉えて良からう。

- (1) 人口増大、都市の過密化と土地の高騰
- (2) 工業生産力と生活様式の向上

後者に対応する施策は発電電力量の増大に頼らざるを得ないが、前者に対しては、電力設備の小型縮小化が要求された。

## 2. 電力界の動き<sup>2,3)</sup>

電力増に応える手段として、当然発電電力量の強化を図るが、送電電圧を従来通りとして、電流を増やすのは送電線路のPR損出の増大を伴う。従って、電流を減らして電圧を上げ、送電電力の確保を図る手段となる。但し、唯電圧を上げただけでは、送電線にしても機器にしても、絶縁寸法が大きくなるので、設備投資額の相対的増大を招き、電力料金の高騰を招くのみとなる。

この大問題が高電圧工学に立脚した絶縁協調思想によって巧みに処理されたと見て良いのではなかろうか。

### 2.1 設備の経済性の基本施策

前記表1の社会情勢に合わせて、日本の電力界がどの様に動いたかも表に併記した。

この間、日本では、増え行く電力需要に応えるため送電電圧も60, 140, 250, 500 kVと略20年毎に倍電圧化した。

その間、電力供給の質の確保と安定化のために本州九州間の連系、50 Hz系と60 Hz系間の東西連系、更には北海道本州間の連系も実現された。戦後の電力界の基本施策は大局的に表2の如くに纏められよう。

以下その内容を少し細かく見てみよう。

### 2.2 大容量化

発電機にしても、変圧器にしてもこれらの所謂電磁機器即ち、磁束を通す鉄心と電流を流す導体とから構成される機器の容量 $P$ 、重量 $G$ および機器内の損出 $F$ （鉄損と銅損）は一次元寸法を $L$ とすれば、下式によって表される。

$$P = VI = \Phi I = [L]^4 \quad (1)$$

$$G = F = [L]^3 \quad (2)$$

即ち、寸法増大によって大容量化すると共に、単器容量当りの損出率 $\varepsilon$ は下式のように軽減する。ここに単位機器容量増大の利点がある。

$$\varepsilon = G/P = [L]^{0.75} \quad (3)$$

勿論、その際、大型化に伴って機器を構成する機械的、電気的諸材料が十分に満足されるものであることが必要となる。これらを克服して、今日では、1,000 MW級の発電機や変圧器が単機で設計製作されている。

表 1 社会情勢と電力界の動き<sup>2)</sup>

西暦年 (日本暦)	社会情勢	電力界の動き
1880 (M13)		電灯 (アーク灯)
1885 (M18)		白熱灯
1887 (M20)		火力発電
1888 (M21)	日本電気学会創立	初代会長 武本武揚
1890 (M23)		水力発電 (蹴上)
1910's (M43)		55 kV 送電開始
1920's (T09)	ラジオ放送開始	154 kV 送電開始
1940's (S15)		本州・九州連繫 (110 kV)
1941 (S16)	太平洋戦争開始	
1945 (S20)	太平洋戦争終結	
1951 (S26)	3 W 景気	
1953 (S28)	白黒 TV 放送開始	275 kV 送電
1956 (S31)	神武景気	
1960 (S35)	カラー TV 放送開始, 岩戸景気, 3C 景気	
1963 (S38)		原子力発電成功
1965 (S40)		東西連繫 (佐久間)
1968 (S43)	いざなぎ景気	
1973 (S48)	一次石油ショック	
1977 (S52)	NY 大停電	
1979 (S54)		北海道・本州連系
1980 (S55)	二次石油ショック	
1983 (S58)		550 kV 送電
1991 (H03)	バブル崩壊	
2000 (H12)		電力自由化

## 2.3 高電圧化

回路理論が教えるように、電圧の二乗に比例して、送電容量は増大する。

$$P_{\max} = V^2/Z \quad (4)$$

但し、 $Z$ : 負荷インピーダンス

尚、電圧  $V$  の回路において、送れる最大電力は負荷インピーダンスが電源インピーダンスに等しい場合である。電力需要の増大と共に必然的に電圧を上げて来た実態が理解される。

表 2 電力増大に対処する基本施策

	系 統 面	機 器 面
経済性探求	大容量化 高電圧化 絶縁協調	試験電圧低減 機器の縮小化
信頼性探求	系統連系、質の確保	耐電圧試験の高度化

表 3 絶縁協調思想の始まり<sup>10)</sup>

1882	Edison 送電開始 (DC 100 V)
1891	Frankfurt 電気博, 三相交流へ
1907	変圧器 試験電圧: 系統電圧の 2 倍の AC
1990's	協調ギャップ採用 但し統流遮断不能
1990's	線路, 変圧器事故続発, 避雷器の原型開発
1920's	線路事故を切り離すための遮断器開発
1928	絶縁協調提唱* (碍子連数の FOV: 変圧器耐電圧値)
1930	SiC 避雷器開発 *W.W. Lewis, P. Sporn
1930's	雷波形観測
1933	変圧器に衝撃電圧試験採用

## 2.4 電力の質の確保

電力の質は、一定電圧、一定周波数、無停電によって代表される。電力供給に際してこれらの問題も最大限に留意された。即ち、電圧を一定に維持するために、負荷時電圧調整器の拡大採用、周波数を安定化するための保護継電方式の高級化 (高速度再閉路など)、系統制御方式の高度化や系統の連系などを揚げる事が出来る。

この間、これらを満足させるための高速応答するパワーエレクトロニクス機器の登場も見逃せない。

## 3. 絶 縁 協 調<sup>4-14)</sup>

表 3 に示した様に、Edison が当初、直流で配電事業を始めて間もなく、その不便さが露呈し、1891 年 Frankfurt 電気博覧会を契機に三相交流に移ったことは周知の所である。交流化と共に当然変圧器が使用されるようになると、雷雨時に米国配電系統に繋がる変圧器の故障が続発した。

当時変圧器は使用される系統電圧の 2 倍の交流耐電圧試験を一分間課せられていた。

その後、雷害防止策として変圧器の手前に協調ギャップを採用し、雷を放電させて、変圧器を保護するようにした。然しながら、送電線の支持碍子の閃絡故障は軽減しないため、碍子メーカーは支持碍子の長さや連結個数の増加を要求した。反面変圧器メーカーは変圧器の事故増大を招くことになるので、これに猛反対し、大論争が起こった。

この問題を円満に解決するために提案を出したのが、

W. W. Lewis, P. Sporn である。

即ち、碍子長の閃絡電圧と変圧器の耐電圧値とを協調させることを提唱した。

これが絶縁協調の始まりである。

この間、協調ギャップは雷の放電には役立つが、雷が過ぎ去っても、継続する交流運転電圧のために持続する交流電流、即ち続流を遮断する能力がないため必ずしも最善策ではなかった。その後、避雷器の原型とも云える各種のものが開発され、後の非直線性  $V-I$  特性を有する SiC（炭化珪素）円板形避雷器の開発へと繋がった。同時に線路への落雷によって発生した地絡事故を速やかに除去するために遮断器の開発が促進された。

他方では、雷観測も進み、その波形が明らかになると同時に、変圧器内への雷侵入時の内部過渡電位振動に伴い、巻線対地や巻線内で絶縁破壊が生じる現象の解析も進み、変圧器の耐電圧試験が交流電圧だけでは不十分で、雷に対する検証試験の必要性が判明し、1933年には衝撃インパルス電圧試験が実施されるようになった。

今日、IEC Publication 60071 1993,

“Insulation Co-ordination” の規格で、絶縁協調の定義は下記のようになっている。

“The selection of the dielectric strength of equipment in relation to the voltages which can appear on the system for which the equipment is intended and taking into account the environment and the characteristics of the available protective devices.” 即ち、

「絶縁協調とは、機器の運転状況と有効な保護装置の特性を考慮に入れて、系統に現れる各種過電圧に耐えられる様に機器の試験電圧を選定すること」となっている。

手順としては、避雷器などの保護装置を考慮に入れて、系統に発生するであろう各種の過電圧を推定することから始まるが、同時にこれを抑える諸施策も打たねばならない。過去半世紀の経緯を纏めてみたい。

### 3.1. 過電圧の抑制

系統に現れる過電圧は主に三種類がある。即ち、

- (1) 過渡交流過電圧  
(TOV: Temporary Over Voltage)
- (2) 開閉サージ  
(Switching Surge)
- (3) 雷サージ  
(Lightning Surge)

#### 3.1.1. 過渡交流過電圧

避雷器の定格電圧は「その電圧に於いて、開閉サージや雷サージを処理できる能力を持つもの」と定義されている。従って、一線地絡状態即ち、健全相が過渡的に交流過電圧状態で健全相にサージが到来する場合でも、充分な責務を果たす必要がある。

換言すれば、一線地絡時健全相の過渡交流過電圧が低ければ、避雷器の定格電圧も下げられ、進入サージの抑

制に寄与する。

概して、健全相の過渡交流過電圧は下式によって表され、零相インピーダンスが低い程過渡交流過電圧が低下する。詳しくは IEC Pub. 60071-2 Appendix B に図表の形で記載されている。

$$TOV=f(Ro/X1, Xo/X1) \quad (5)$$

但し、 $R_o$ ,  $X_o$ ,  $X1$  : 零相抵抗, 零相リアクタンス, 正相リアクタンス

従って、従来の 60 kV, 140 kV で採用された抵抗接地方式や非接地方式では過渡交流過電圧が常規対地運転電圧の凡そ  $\sqrt{3}$  倍に跳ね上がるが、250 kV 以降の送電線路では直接接地方式を採用し、過渡交流過電圧を常規対地運転電圧の凡そ 1.25 倍以下に抑え、避雷器の定格電圧を低減することが出来、機器への進入サージの低減に役立てた。

#### 3.1.2. 開閉サージ

開閉サージは名の通り遮断器類の開閉に伴って発生する過電圧である。過酷な場合の一例を揚げよう。既に触れたように、電力系統の安定度や電力供給寸断時間の短縮のため、地絡時の再開路方式が望まれた。

即ち、図 2(A) の様な単相送電線路を想定し、一旦遮断した後に間もなく再投入する時の過渡現象を考える。電圧が負の最大値の時に線路が遮断され、数 10 サイクル後に電圧の正の最大値で再投入された場合、投入抵抗無しでは、過渡現象は同図(B)に示す様に對地電圧は常規對地運転電圧波高値の 3 倍のサージが発生する。

これを抑制するために、500 kV 系統で採用されたのが投入抵抗方式で、図 2(A) に示すように、再開路時に先ず接点 1 を閉じて、約 10 ms 後に、接点 2 を閉じる方式である。この様にすると同図(C)に示す様に、對地過電圧は常規對地運転電圧波高値の 2.2 倍以下に低減される。

更に、将来予定されている 1,000 kV 送電線路では、遮断抵抗をも採用し、1.6 倍以下とし更なる開閉サージの低減が検討されている。

これら諸施策の結果、現在系統電圧毎に考えられている開閉サージの大きさは表 4 の如くである。

この様な開閉サージは近時では、避雷器によって抑制できるが、開閉サージの波形は様々であり、機器の絶縁特性に最悪の波形が存在する。

図 3 で、波形による気中の正極性 50%FOV（フラッシュオーバー電圧）特性を示す様に、波頭長に対して V 特性を有する。即ち、500 kV 系統で考えられる気中絶縁距離 5 m 前後では、サージの波頭長 250  $\mu$ s 辺りで V 特性の底に近く、最低の FOV となる。

これらを背景に、開閉サージの標準波形として、正極性 250/2500  $\mu$ s（波頭長/半波尾長を表す）が選定されている。

気中棒平板電極での、最低 50%FOV は

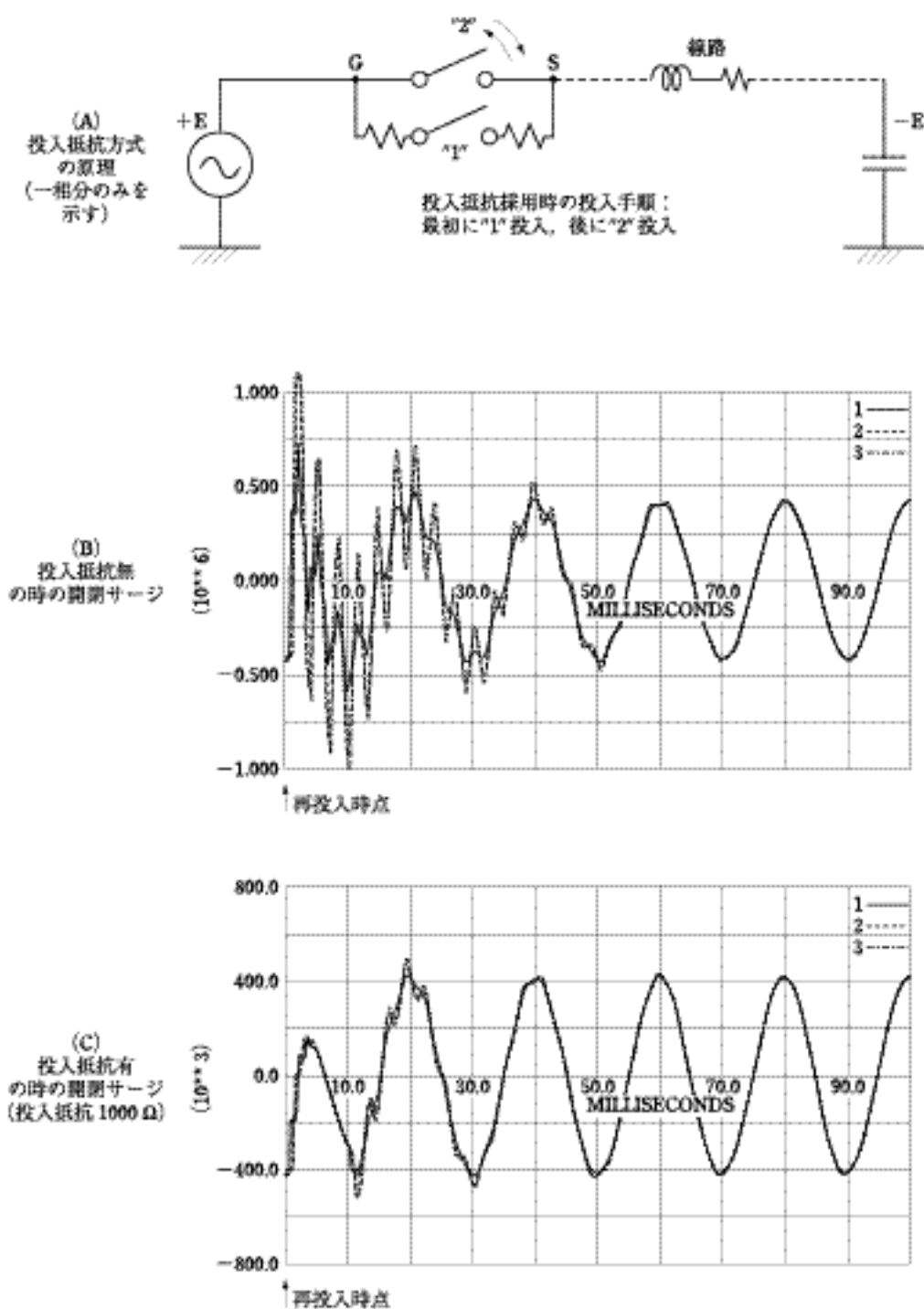


図2 線路再投入サージの様相

$$\text{FOV}_{50} = 1080 \cdot \ln(0.46 \cdot l + 1) \quad (\text{kV}) \quad (6)$$

但し、 $l$ : ギャップ長 (m)

即ち、絶縁距離を増やしても FOV は飽和傾向を示す。依って、予想される開閉サージの大きさを野放しにして置くことは高電圧機器の気中絶縁に大幅な不利益を齎すことになる。

又、このような波形を有する電圧に対する機器の耐電

圧試験が必要となる。

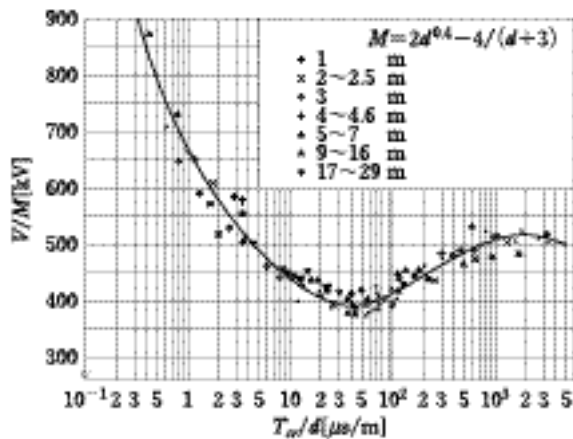
尚、油中や SF6 ガス中では、この様な V 特性はない。

これまで、対地の開閉サージを考えたが、同様な開閉サージは相間にも発生する。即ち、相間には対地サージの 1.5~1.7 倍の大きさの相間サージが現れることが確率的に考えられている。換言すれば或る相に 1.0 の対地サージが発生する時、他相には 0.5~0.7 の逆極性対地

表4 電圧階級と開閉サージ倍数

Um	開閉サージ倍数
140 kV 以下	3.0 Em
250 kV	2.7 Em
500 kV	2.2 Em
1000 kV	1.6 Em

$E_m = \sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$  : 常規対地運転電圧波高値

図3 電圧対波頭長特性の基準曲線<sup>11)</sup>

$d$ : ギャップ長 (m)

$T_{cr}$ : サージの波頭長 ( $\mu s$ )

サージが発生することを意味する。依って、その様なサージにも耐えられる様に、機器の相間に開閉サージ耐電圧試験を実施する必要がある。

### 3.1.3. 雷サージ

送電線路への落雷現象には周知の様に、架空地線の遮蔽失敗による線路への直撃雷と鉄塔へ雷撃したための鉄塔電位の上昇による鉄塔から線路への逆閃絡とがある。今日両者を含めた雷による機器の事故確率は800年に1度程度に抑える様に系統の絶縁設計が図られている。その際必要となる雷撃電流の累積頻度分布は図4の如くに統計的に纏められている。

変電所へ侵入する雷サージの抑制は専ら避雷器に頼るが、既述のように、避雷器の定格電圧が下がった分、自動的に雷サージの抑制効果がある。

従来の140 kV 以下の系統で使用された避雷器の定格電圧と系統電圧との比を100%とすれば、250および500 kV 系統用のそれらは80, 60%定格電圧の避雷器が使用されている。

更に、次節で述べる様に近時の酸化亜鉛素子は雷サージの処理責務能力が一段と向上しているので、雷サージ低減に拍車を掛けた。

現在、雷サージの標準波形は1.2/50  $\mu s$  (波頭長/半波尾長を表す) と定められている。気中棒平板電極での正

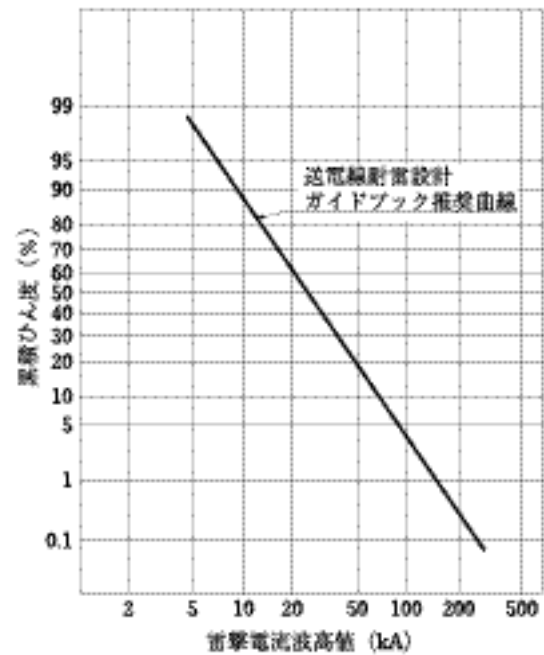


図4

極性50%FOV は

$$FOV_{50} = 530 \cdot I(kV) \quad (7)$$

但し、 $I$ : ギャップ長 (m)

(6), (7)式を比べると自明のように、雷サージに対しては、絶縁距離に比例して、FOV は上昇する。

尚、雷サージが或る相に雷撃した場合、対地波と線間波に分派して進行する。

遠方雷が変電所へ進行する場合、対地波成分は大きい減衰が大きい。線間波成分の減衰は余り大きくないが、絶対値が低いので、相間雷サージが対地雷サージの2倍まで上昇することはない。近接雷の場合は、対地雷サージがそのまま相間雷サージに等しいと考えられている。

総じて、雷サージに対しては、相間雷サージを考慮することなく、対地雷サージのみを対象として機器の対地耐電圧試験のみを行えば充分と考えられている。

### 3.2 機器試験電圧の低減

前節で考察したように、各種過電圧が首尾良く抑制されれば、運転中の機器に掛かる過電圧も当然下がる訳で、機器の試験電圧も下げ得ることになる。即ち、低減絶縁 (Reduced Insulation) 採用により、送電線、機器の経済性に大きく寄与する。

斯様にして、商用周波交流電圧に対する試験耐電圧値 PFVW (Power Frequency Withstand Voltage)、開閉インパルス電圧に対する試験耐電圧値 SIWV (Switching Impulse WV)、雷インパルス電圧に対する試験耐電圧値 LIWV (Lightning Impulse WV) は送電電圧の上昇と共に相対的に軽減された。その実態を表5に示す。こ

ここで、留意すべきは、従前の140 kV以下の機器には、開閉サージに対する試験電圧を印加して来なかったが、250 kV以上の機器にはこれを課すようにした。

尚、「サージ」とは系統に発生する過電圧、「インパルス」とは試験の為に用いられる電圧で、両者の用語上の定義が決められている。

### 3.3 耐電圧試験の高度化

所で、試験耐電圧値を下げ得たことによって、機器の信頼度低下を招いては主客転倒することになる。これを側面援助するために、耐電圧試験の高度化が検討された。

我が国では、送電電圧250 kV以上の機器に対して、下記の様な対策が打たれた。

- (1) 交流耐電圧試験は従来一分間印加であったが、過渡交流過電圧に見合う従来より低い試験電圧を一時間印加とした。
- (2) その間内部部分放電を測定する。

この試験は交流試験電圧印加中に機器内部に発生するかもしれない微弱放電をも検出する試験であ

る。その許容値は100 pC程度 (BGN: Back Ground Noise) 以下とされている。

- (3) 開閉インパルス耐電圧試験は対地に1.0および相間1.5の大きさの電圧を印加する。或いはこれと同等の耐電圧性能を交流電圧か雷インパルス電圧で検証することになっている。
- (4) 雷インパルス耐電圧試験は従来通り対地に対して実施する。この試験で相間雷サージに対する耐力検証にもなる。

## 4. 送変電機器の変遷<sup>15-20)</sup>

前節までに述べた絶縁協調理論によって齎された諸施策があらゆる機器の経済性に恩恵を与えたが、筆者が関係させて頂いた範囲の送変電機器が如何にそれを享受出来たかを簡単に振り返ってみたい。

### 4.1 変圧器

まず、他の送変電用機器に比して最も高価な変圧器が恐らく最大の恩恵に浴したであろう。図5には我が国に於ける送電電圧および変圧器単器容量の推移を示した。如何に大容量化が進んだかが分かる。これに寄与した要因は下記の3点であろう。

- (1) 250 kV以上の送電線に直接接地方式採用による変圧器の低減絶縁と段絶縁の採用。
- (2) 単巻変圧器の採用
- (3) 方向性珪素鋼帯の出現と利用

既述のように、送電電圧250 kV採用時点で、送電電圧の上昇にも拘らず、変圧器の試験電圧は比較的に下げ

表5 機器の試験電圧 (概略値 kV)  
Um: 系統最高運転電圧 (kV)

	161 kV 以下	275 kV	550 kV	1100 kV
PFWV	2.0 Um	1.64 Um	1.2 Um	
SIWV	—	0.83* LIWV	0.83* LIWV	0.83* LIWV
LIWV	5 Um +50	3.8 Um	2.5 Um	1.8 Um

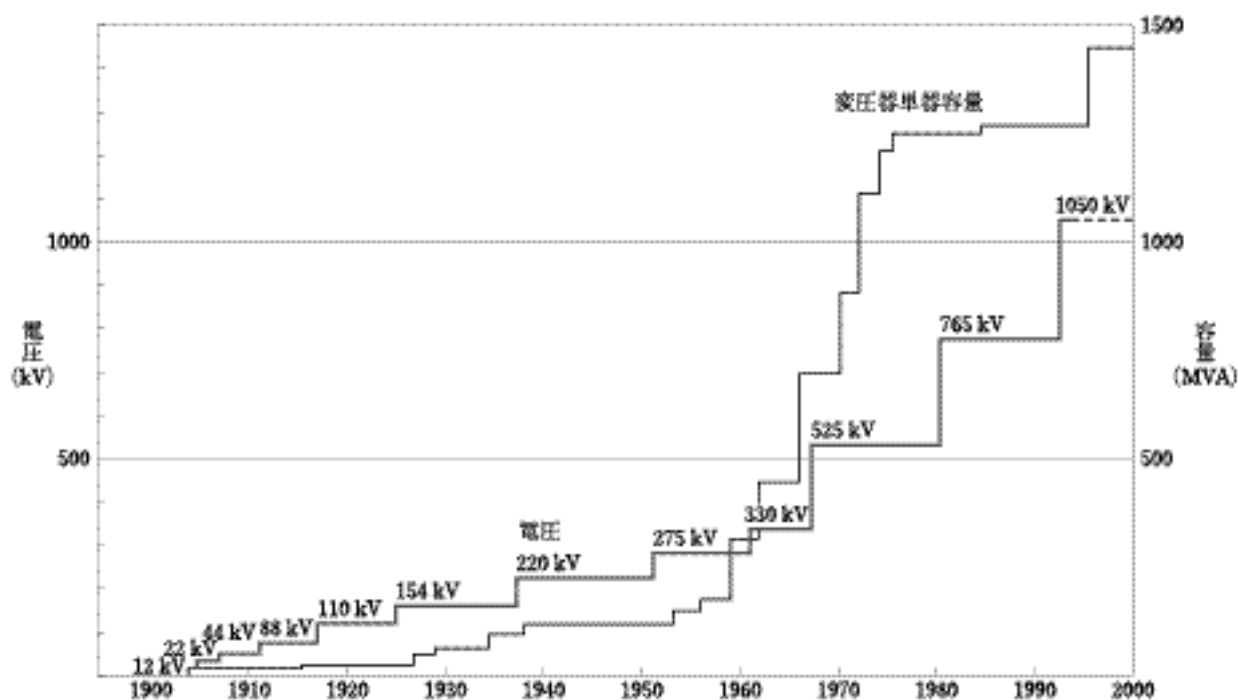


図5 変圧器単器容量推移とその定格電圧<sup>16)</sup>

られたので、経済性は当然高まるが、更に変圧器の中性点は常時接地即ち零電位であるから、高電圧巻線に段絶縁 (Graded Insulation) を採用し、これを構造的に充分活かすことが可能となった。即ち図6の如く高電圧側巻線を円筒状に施し、その中性点側を低電圧巻線に對面させた合理的構造の採用が可能となった。大容量火力発電機用通昇変圧器1500 MVA 級が合理的に実現できた。

続く500 kV 送電の開発時点で必要となった500/250 kV 連系用変圧器においては、両系統直接接地系であるので、単巻変圧器を安心して採用出来るようになった。即ち、単巻変圧器は通過容量  $P_s$  に対して、自分自身の所謂自己容量  $P_a$  は(8)式によって表されるので、半分の大ききで変圧器が済むことになった。

$$P_a = (1 - 1/a) P_s \quad (8)$$

但し、 $a$  : 高低圧巻線の電圧比 (巻数比)

250/500 kV 連系用1,000 MVA (自己容量500 MVA) 変圧器が実現したのはこの御蔭である。

更に加えて方向性珪素鋼帯の出現は鉄心内で発生する鉄損の軽減に大きく寄与した。

勿論、此の種材料を活かす構造が考案されたことも記憶に留めて置きたい。

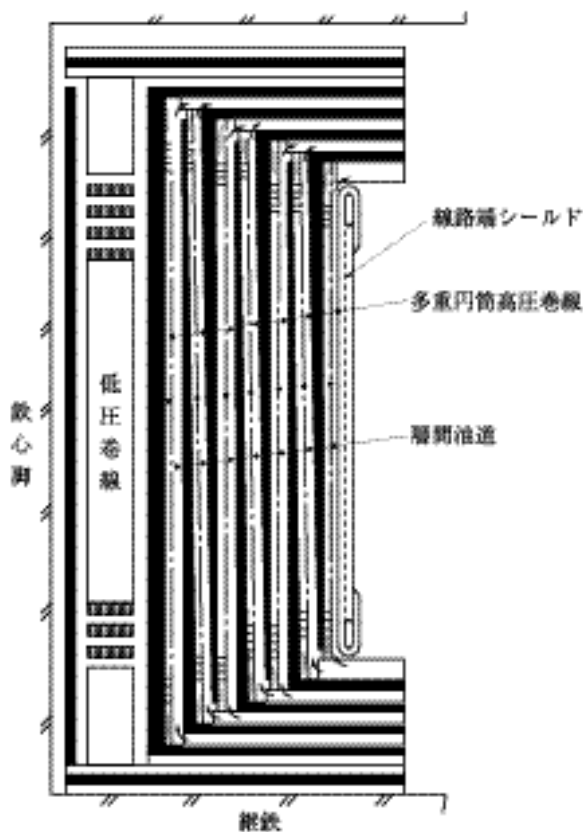


図6 巻線断面図

## 4.2 避雷器

既に述べたように、送電線の雷害防止のため当初、協調ギャップで始まったが、1940年代 SiC (炭化珪素) 円板の開発に成功した。1970年代に入って、ZnO (酸化亜鉛) 素子の開発によって大きく避雷器は飛躍した。

即ち、図7に示すように、避雷器素子の V-I 特性は通常(9)式によって表されるが、 $\alpha$  の値は SiC, ZnO 夫々で10, 50程度である。

$$I = kV^\alpha \quad (9)$$

但し、 $\alpha$  : 非直線指数

同図から分かる様に、SiC 円板では常規運転電圧下でも、数十 A の漏れ電流が避雷器に流れ避雷器を加熱破壊させる危険性があるので、図8に示す様に常時はギャップで、素子を遮断しておく必要があった。しかし、ZnO 素子の常規電圧下での漏れ電流は高々数十  $\mu A$  であって、ギャップの必要が全くない。更に近時では、素子の放電耐量の向上、高耐圧化によって、益々小さく経済的な円板が実現している。

この様に避雷器のギャップがなくなり、信頼性が向上したので、送電線自身に避雷器を取り付けて、変電所への雷襲撃を未然に防止出来るまでになった。

## 4.3 開閉装置

一言で開閉装置と言っても、各種のものがある。既に触れたように、当初は所謂スイッチで、負荷電流の開閉機能しか持たない開閉器であったが、地絡や短絡時50~80 kA にも及ぶ事故電流をも遮断できる様な所謂遮断器が開発された。大まかに言って、その歴史は表6に

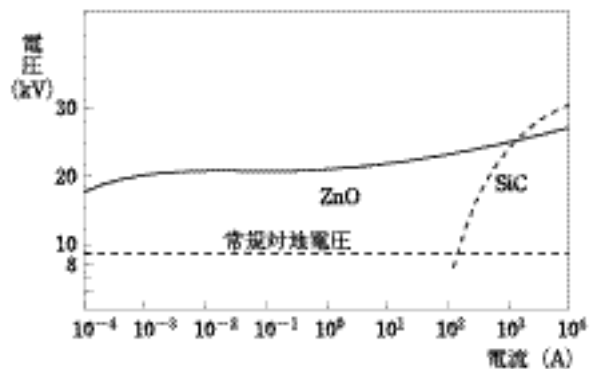


図7 電圧-電流特性

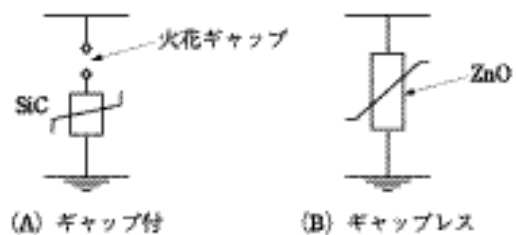


図8 避雷器の構造



示す如くである。

主に60 kV 以上の高圧領域では油、高圧空気(15気圧, 30気圧), SF<sub>6</sub> (六弗化硫黄) ガス (3~5 気圧) の順序に、序に30 kV 以下の中低圧領域では空気、磁気、真空の順にこれらが絶縁、消弧媒体として使用され、今日に至った。

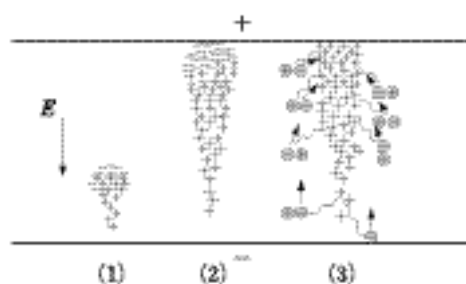
油は大気圧の消弧能力より遙かに優れている上に開路時極間(接点間)の絶縁耐力にも有利である。但し、可燃性が唯一欠点である。それに代わって空気が登場したが、消弧能力を確保するため、高気圧を使用せざるを得ない。又、開閉操作の度に排気が必要とするので、操作音が公害上の問題となった。この様な経過を経て、SF<sub>6</sub> ガスの登場となった。

SF<sub>6</sub> ガスは1901年米国 Allied Chemical 社によるウラン精製技術開発過程での副産物である。このガスは下記のような特徴を有するため、早くから電気機器への応用が考えられていた。偶々近時、その製造が工業化され、経済的に入手可能となったため一躍開閉装置に利用されるに至った。

SF<sub>6</sub> ガスは電氣的負性ガスと言われ、図9に示す様

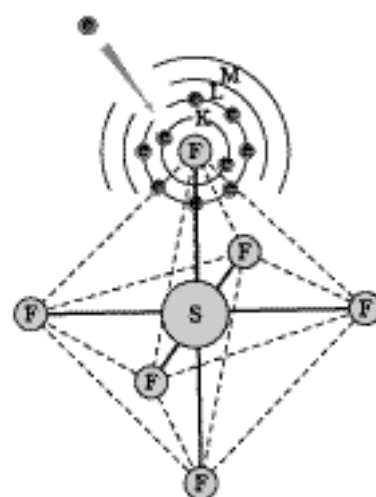
表6 高圧遮断器の大まかな歴史

油開閉器	明治時代
タンク形油遮断器	大正時代
碍子形少油量遮断器	昭和10年代
空気遮断器	昭和20年代
SF <sub>6</sub> ガス遮断器	昭和30年代



(A) 気体中の放電現象

高電界下で雪崩現象により電子が増殖され、これが絶縁破壊の源となる。



(B) SF<sub>6</sub> ガスの分子構造

弗素原子のL殻には電子の空席があるため、放電に寄与する電子を付着して、絶縁破壊を阻止する。

に放電に寄与する電子を吸収付着する性質を有するため、絶縁特性が優れている。定量的に下記のような特徴があって、3~4 気圧(ゲージ) が用いられている。

- (1) SF<sub>6</sub> ガス絶対1 気圧は凡そ大気の3 倍の絶縁強度をもっている。依って、3 気圧で使用すれば空気の約10 倍で、油と同程度の絶縁強度が得られる。
- (2) 消弧能力は表現が難しいが、ざっと絶対1 気圧で凡そ空気の数倍以上の能力を有する
- (3) 容器の強度設計上も3 気圧程度が経済設計的に最善である。
- (4) 3 気圧での液化温度が-40℃で、寒冷地にも適する。
- (5) ガスの熱的分解温度は凡そ250℃である。常温では極めて安定で、無臭無害とされている。

この様な SF<sub>6</sub> ガスを絶縁消弧媒体として使用すれば遮断器のみでなく、変電所を構成する断路器、接地装置、母線など機器の縮小小型化が図れる。GIS (Gas Insulated Switchgear: 密閉形ガス絶縁開閉装置) の出現である。一般に、送電端にせよ受電端にせよ変電所の構成は単線結線図で示すと、図10の如くで、これに従って機器を配列すると図11のようになる。従来型開閉装置に比べて、縮小率は電圧階級にもよるが、500 kV の場合、凡そ容積、面積夫々が8, 3%に縮小される。この様にして、GIS は過密化した大都市の電力供給に大きく貢献した。

尚、このガスは野放しでは地球温暖化の一因にもなるので、この取り扱いは十分な配慮の下に封入排気処理が行われている。

図9 SF<sub>6</sub> ガスの高絶縁特性

## 5. 21世紀の電力技術<sup>21-23)</sup>

この様に華々しく発展した電力供給技術も昨今では公害問題など多くの難問に遭遇しているのは周知の通りである。

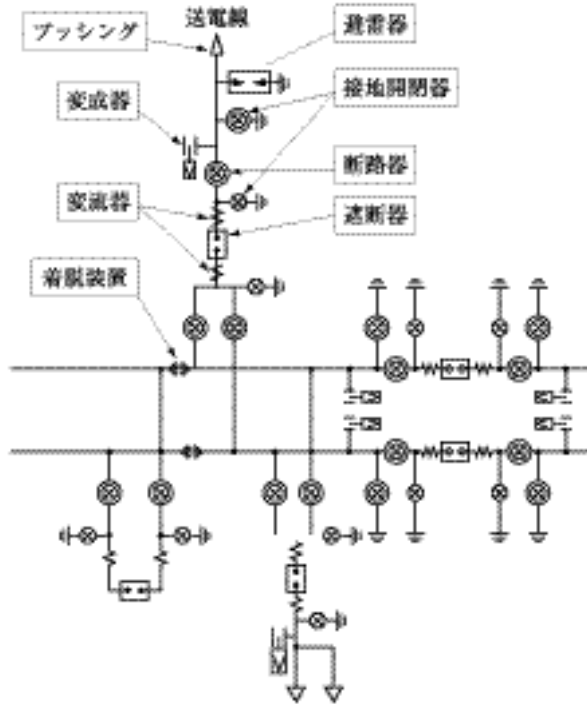


図10 単線結線図

地球温暖化の一因でもある SF6 に代わる絶縁媒体の探索も重要である。絶縁消弧媒体の一つとして有望視されているのが真空である。真空は図12に示す様に Paschen の法則によって  $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{Tor}$  では、高い絶縁性能と消弧性能とを有する。

他方、石油、石炭など有限な非循環型資源の有効利用のための燃料電池発電、太陽光、風力などの循環型資源を利用した発電、或いはこれらに代わる資源の探索も着実に進みつつある。

何れにしても、環境との調和を図った電力技術が要求されよう。

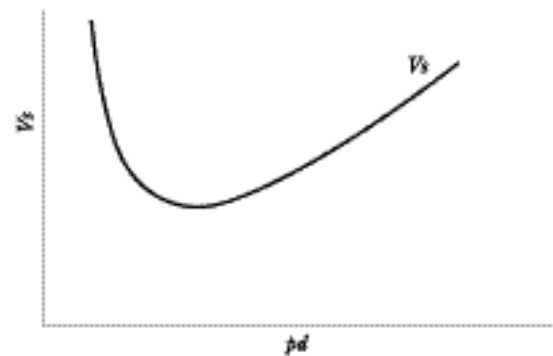


図12 平行平板での Paschen の法則

$p$ : 気圧 (mmHg),  $d$ : ギャップ長 (mm),  $V_s$ : 火花電圧 (V)

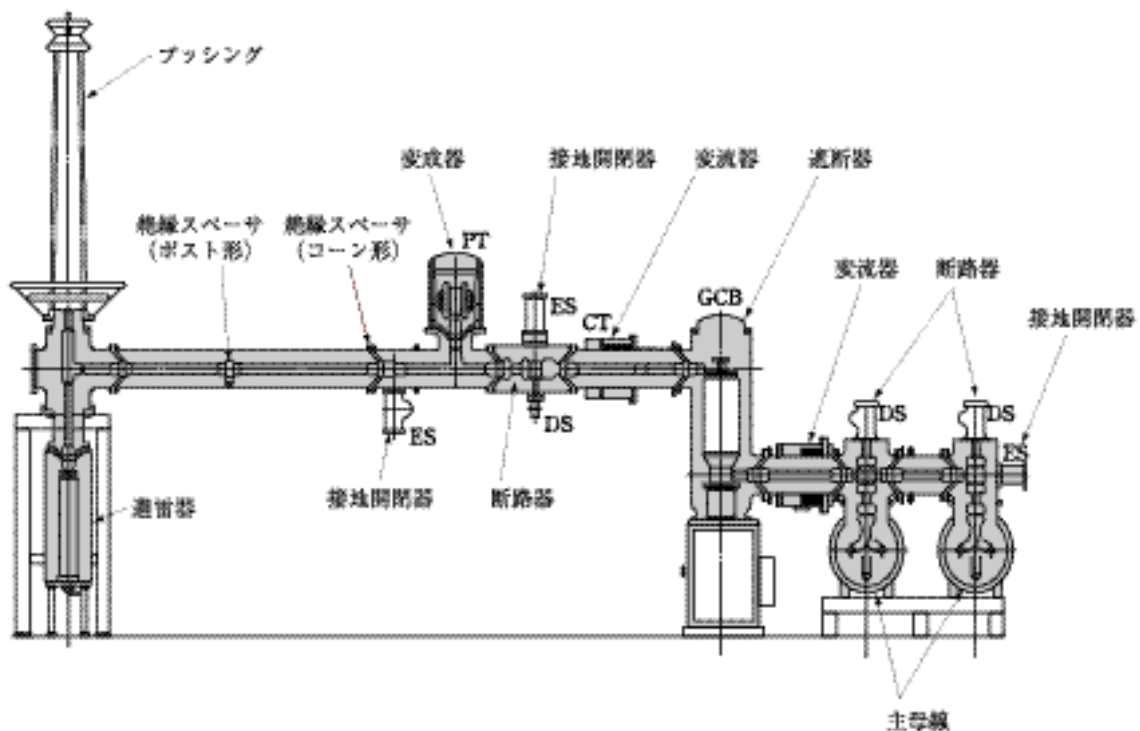


図11 GISの構造断面図

更に、電力自由化を背景として、経済性、信頼性確保のため現有設備異常の早期発見、早期補修を目的とした絶縁診断技術も重要である。

### ま と め

約半世紀間の電力需要増大に対して、私が関係させて頂いた送変電機器の製造技術が如何に対処して来たかを絶縁協調技術を軸とした観点から簡単に振り返って見た。

今後も電力需要は相変わらず伸び続けるであろう。経済性と信頼性を無視した技術開発は許されない。今後の参考になれば幸いである。

末筆ながら、機器に関する諸資料は東芝より頂いた。衷心より謝意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) 日本国勢図会：日本の100年
- 2) 電気学会：電気学会100年
- 3) 川口芳弘：あらすじ電機技術史 国土館大学工学部紀要第34号 2001
- 4) IEC Pub. 60071-1 Part 1 “Insulation Co-ordination” 1993
- 5) IEC Pub. 60071-2 Part 2 “Insulation Coordination—Application Guide” 1996
- 6) JEC-0102-1994 試験電圧標準
- 7) IEC Pub. 60099-4 “Surge Arrester” 1991
- 8) IEC Pub. 60099-5 “Surge Arrester-Selection and Application Recommendation” 1996
- 9) JEC-217-1984 酸化亜鉛形避雷器
- 10) 河野照哉：系統絶縁論 コロナ社1981
- 11) 尾崎勇造編：高電圧電力工学 電気書院 1997
- 12) 電中研 研究報告 175034 送電線耐雷設計ガイドブック 昭和51年3月
- 13) K. H. Weck: Insulation Coordination and Testing of GIS CIGRE SC33 Colloquium 1983 (Edinburgh) 33.83 (SC) 05
- 14) CIGRE SC33 Report: Phase to Phase Insulation Coordination. Electra 64 (1979) P137
- 15) 日本電機工業会：電機工業会50年の歩み 1998
- 16) 東芝：東芝変圧器100年
- 17) 東芝：東芝避雷器の歴史と変遷
- 18) 東芝：東芝遮断器・避雷器の歴史
- 19) 東芝：東芝ガス絶縁開閉装置30周年
- 20) 東京電力：変電技術史 1995
- 21) 川口芳弘：古代人類が考えた四大元素に学ぶ 国土館大学工学部紀要第35号 2002
- 22) 柳父悟 他：SF6 ガス代替の新しいスイッチギヤの概念放電研究会 2002
- 23) Y. Kawaguchi et al: Insulation Diagnosis of Electric Apparatus with Neural Networks Application 国土館大学工学部紀要第35号 2002